Energy, Mines and Resources Canada

Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

POTASH MINING PROJECT

PROJET D'EXPLOITATION DE LA POTASSE

MINERAL AND ENERGY TECHNOLOGY

MINING RESEARCH LABORATORIES

LE REMBLAYAGE DES MINES DE POTASSE AU NOUVEAU BRUNSWICK

2éme Phase

Février 1990

Sommaire du
Rapport Final pour:

DENISON-POTACAN POTASH COMPANY
Sussex, Nouveau Brunswick

Préparé par:

MRAZ PROJECT CONSULTANTS Ltée.
Saskatoon, Saskatchewan

Traduit par:

Maurice B. Dusseault, PhD, PEng
Université de Waterloo

Ce projet fait partie d'une Convention pour le Développement des Mineraux entre les gouvernements du Canada et du Nouveau Brunswick, et a été conduit sous l'authorisation de CANEMT, Département d'Energie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada

Approvisionnements et Services Canada (ASC)
No. de fichier ASC (DSS): 14SQ.23440-7-9228
No. de contrat ASC (DSS): 23440-7-9228/01-SQ
No. de projet CANEMT: 1.4.09.05
Agent Scientifique de CANEMT: Dr. G. Herget, PEng

MICROMEDIA

41pp

Remerciements

Ce rapport était préparé par Mraz Project Consultants Lté. (MPC) de Saskatoon, Saskatchewan, avec l'assistance et la participation des personnes et organisations ci-dessous:

* Toutes les essais sur chantier et la surveillance du comportement des roches à profondeur ont été réalisés par S. MONROE et R. FRY sous la direction de D.C.E. WAUGH, Directeur de Génie, de la société Denison-Potacan Potash Company (DPPC).

* Les essais de laboratoire ont été réalisés par C.J. FORDHAM, dans les laboratoires WATSALT à l'Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, sous la direction de M.B. DUSSEAULT.

* Les essais de laboratoire sur les déchets d'halite granulaires ont été utilisés par C.J. FORDHAM pour sa thèse de 3ème cycle, accomplie d'une façon parallelle avec ces études.

* Les analyses paramétriques sur les données de laboratoire et sur chantier ont été réalisées par L. ROTHENBURG, Département de Génie Civil, l'Université de Waterloo, Waterloo, Ontario.

* Le logiciel "FLAC" a été aquis de "ITASCA Consulting Group Inc." par MPC. Les lois de comportement pour les matériaux intactes et l'halite granulaire ont été instalés dans "FLAC" sous un contract entre MPC et ITASCA. Les lois de comportement fondamentales pour le sel gemme intacte et le sel gemme granulaire ont été développées par MPC et l'Université de Waterloo.

* Les analyses numériques en trois dimensions ont été réalisées par L. ROTHENBURG, du Département de Génie Civil de l'Université de Waterloo à Waterloo, Ontario, en utilisant le logiciel VELMINA. Le logiciel VELMINA est basé sur une méthode de discontinuité de déformation (noyaux de déplacement) pour les milieux viscoélastiques.

TABLE DE MATIERES

Remerciements

Liste d'illustrations

1.0 Introduction

2.0 Les essais sur chantier

3.0 Les essais de laboratoire

4.0 Les analyses paramétriques des données sur le sel gemme

5.0 La modélisation numérique en deux dimensions

6.0 La modélisation numérique en trois dimensions

7.0 Conclusions et recommandations

8.0 Bibliographie

LISTE D'ILLUSTRATIONS

N° 1 : Location géographique de la mine DPPC à Clover Hill

N° 2 : La géologie du sous-bassin Moncton dans le Nouveau Brunswick (de Waugh et Urquhart, 1983)

N° 3 : La mine Clover Hill : disposition générale

N° 4 : Le Panneau n° 17 : une section géologique typique

N° 5 : Loi de fluage empirique pour les résidus d'halite

N° 6 : La relation entre la résistance en compression simple et la force de compaction pour des échantillons à porosité 0,14, 0,18. 0,22, et 0,26

N° 7 : La relation entre la force de compaction "zéro" et la densité incrémentale pour les résidus de DPPC

N° 8 : Le comportement mécanique des résidus compactés à une porosité de 0,22, contrainte de confinement de 1,03 MPa, vitesse de déplacement de $10^{-4}s^{-1}$

N° 9 : Les mécanismes de déformations pour le sel gemme (de Munson, 1979)

N° 10 : DPPC Panneau n° 11 ; géométrie d'exploitation

N° 11 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; géométrie d'exploitation

N° 12 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; contraintes normales

N° 13 : DPPC Panneaux n° 11, 12, 13 ; remblayés, la densité après onze années

N° 14 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; géométries d'exploitation avec le remblayage

N° 15 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; la densité du remblayage

N° 16 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; la vitesse de convergence

N° 17 : DPPC Panneaux n° 10, 11, 12 ; la vitesse de convergence de la mine avec l'extraction secondaire

1.0 INTRODUCTION

La mine DPPC se trouve au sud-ouest de Sussex, Nouveau Brunswick (figure 1). Le dépôt de potasse de la mine DPPC à Clover Hill fut identifié en 1973 par les forages exploratoires du Département de Ressources Naturelles du Nouveau Brunswick. Le dépôt est limité au synclinorium Marchbank, qui est le trait structural saillant dans la région méridionale du sous-bassin Moncton (figure 2).

Le dépôt de potasse DPPC se trouve à une profondeur moyenne de 880 m (sous-surface). Dans le plan horizontal, le dépôt a une longueur de 10 km (à peu près), et une largeur maximum de 3,5 km. Des dessins démontrant les Panneaux 10, 11, 12, avec une coupe transversale du Panneau 11, se trouvent dans les illustrations (figures 3, 4). La méthode d'exploitation du minérai potassique est par chambre et piliers, en utilisant les moyens d'extraction forage et tir ou d'extraction continuelle. Les convoyeurs sont utilisés pour la transportation sous-terraine jusqu'au point de stockage, d'où la méthode de transportation à la surface est par une skip de 25 tonnes. Le minérai est transporté à l'usine d'extraction, la sylvite est séparée, et les résidus halitiques sont dirigés vers le chantier d'exploitation souterrain pour le remblayage, ou sont stockés à surface dans un étang.

Après la séparation de la saumure par la filtration sous vide, les résidus sortent de l'usine d'extraction à une teneur en eau de 8%, d'où ils sont dirigés vers le puit par convoyeur. Ils sont introduits dans un tuyau vertical de 200 mm de diamètre installé dans le puit, et tombent au niveau 795 m, d'où ils sont dirigés par convoyeur vers les sections de la mine qui sont en train d'être remblayées.

Répondant à une demande de propositions, au mois de juillet, 1985, une soumission pour un projet de recherche par DPPC fut envoyée au Ministre d'Approvisionnement et Services, ayant le titre "Use of Backfill in New Brunswick Potash Mines" (soit "l'Utilization du remblayage dans les mines de potasse du Nouveau

DENISON POTACAN POTASH COMPANY	TITLE: LOCATION OF MINE SITE	SCALE: N.T.S.
		FIGURE: 1

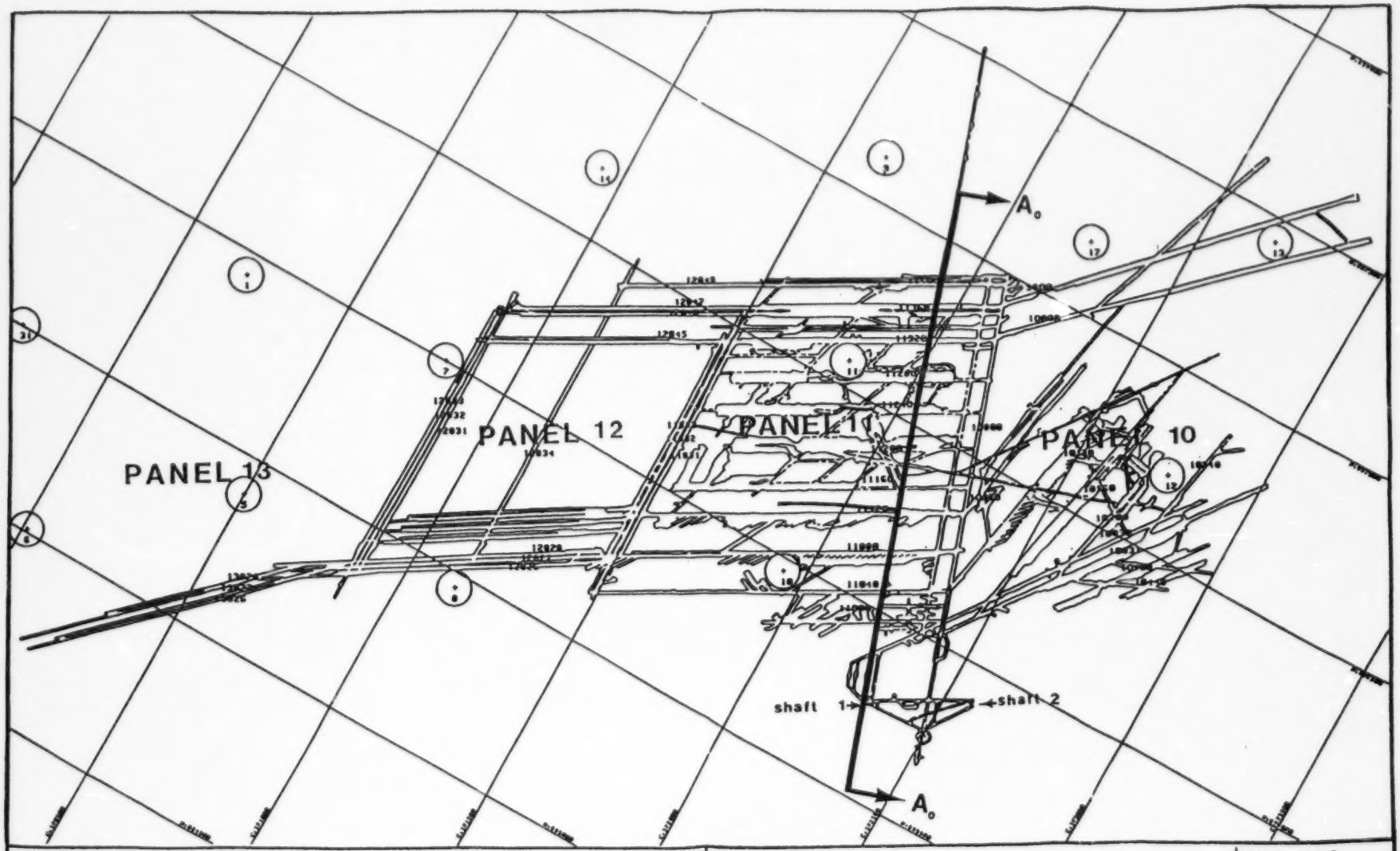
DENISON POTACAN POTASH COMPANY

TITLE:

GEOLOGY OF THE MONCTON SUBBASIN IN NEW BRUNSWICK
(After Waugh and Urquhart, 1983)

SCALE:
N.T.S.

FIGURE:
2

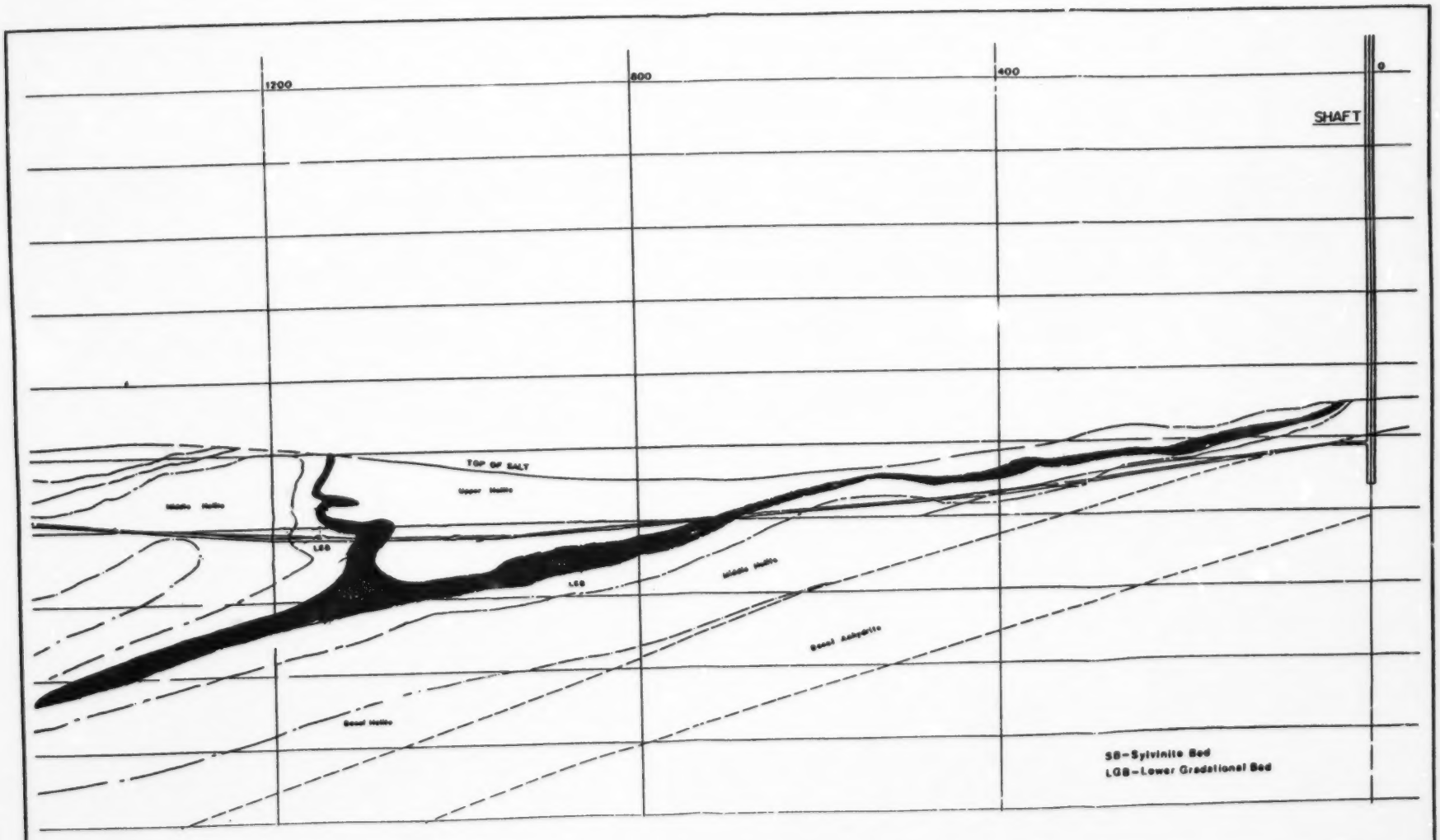


DENISON POTACAN POTASH COMPANY

TITLE:
CLOVER HILL MINE
GENERAL MINE PLAN

SCALE: NTS

FIGURE:
3



DENISON POTACAN POTASH COMPANY

TITLE:

PANEL 11
TYPICAL GEOLOGICAL CROSS-SECTION

SCALE: N T S

FIGURE: 4

Brunswick"). Le but du projet était la recherche sur les méthodes d'emplacement et le comportement des résidus de l'usine d'extraction en supposant que le remblayage supportera les chambres et stabilisera la mine entière. Ceux-ci pourraient améliorer l'efficacité d'extraction souterraine, et aussi éviter les problèmes environmentaux liés au stockage à surface.

Un contrat fut accordé à DPPC sous le titre ci-dessus, Phase I. Un rapport sur les résultats de ce contrat fut soumis au mois de mai, 1987, pour satisfaire les conditions de Contrat ASC n° 0SQ85-00208/CANMET, Projet n° 1.4.09.05. Le remblayage a commencé à la mine DPPC au mois de février, 1987. Cependant, il y restait quelques questions importantes qui n'avaient pas été étudiées pendant les activités de la Phase I.

Au mois de mai, 1987, une deuxième proposition de recherche pour continuer les travaux fut soumise sous le titre ci-dessus, Phase II. Un contrat fut accordé au mois de janvier, 1988, et DPPC a retenu les services de MPC pour coordonner le projet et réaliser quelques travaux.

La suite est le rapport final (en anglais, sauf cette introduction) des travaux accomplis sous Contrat ASC n° 23440-7-9228/01-SQ, Projet CANMET n° 1.4.09.05.

2.0 LES ESSAIS SUR CHANTIER

L'importance des données in situ pour les contraintes et les déplacements autour des chambres à profondeur a été reconnue par la société DPPC dès l'année 1982. Cette année-là, ils avaient déjà installé des instruments simples et robustes pour capter l'information sur la distribution des contraintes et des déplacements. Les données furent enregistrées par les moyens électroniques programmables.

Avant de mettre la mine en production au mois de juillet, 1985, deux chambres expérimentales furent établies. Les sites "la petite chambre" et "la grande chambre", creusés en 1982 et 1983, ont été discutés en détail dans le rapport pour la Phase I. Depuis juillet, 1985, l'accent fut accordé à la surveillance des sites d'exploitation active. Un site à pleine échelle pour la mécanique des roches pendant le remblayage a été choisi dans la chambre d'exploitation 11200 (antérieurement appellée Stope 1105) pour surveiller le comportement des murs et plafonds.

Des cellules gaufrettes à pression et des extensomètres à points multiples furent installés à diverses profondeurs dans le mur et le plafond de la chambre 11200. L'installation dans le plancher fut empêchée par l'accumulation de la saumure venant d'un site d'exploitation à proximité. Les cellules à pression furent installées dans le remblai pour surveiller le développement des contraintes. Tous les capteurs électroniques étaient munis de moyen de transmission automatique des données à un enregistreur lointain. Il était nécessaire de protéger les installations contre la corrosion et les impactes.

Des instruments pour surveiller la fermeture entre le plafond et le plancher furent installés pour donner l'information de base pour la modélisation numérique. Les tunnels d'accès ont été utilisés pour l'évaluation des instruments, pour essayer des types divers de cellules de pression, et pour donner de l'information supplémentaire pour la calibration et la vérification des analyses numériques.

3.0 LES ESSAIS DE LABORATOIRE

Un programme d'essais sur des carottes forées dans les roches supérieures aux couches de minérai a fourni les paramètres de comportement mécanique pour la modélisation numérique. Quatre types d'essais furent accomplis sur quatre matériaux:

1. Les mésures de célérité sonique pour la calibration des paramètres élastiques dynamiques;
2. Les essais de traction bréziliens;
3. La résistance en compression simple; et,
4. Les essais triaxiaux de résistance à la compression.

La déformation rapide cyclique à des niveaux de contrainte élevée pendant les essais de compression simple donnait les paramètres de rigidité.

Les essais sur les résidus accomplis par les travaux de la Phase I, étant préliminaires, ont été continués pendant la Phase II. La compaction en fluage pendant 90 jours a supporté l'hypothèse préliminaire que le support donné à la mine par les résidus sera très faible avant que la porosité libre soit largement éliminée par la fermeture lente des cavernes remblayées.

Les essais triaxiaux accomplis pendant les travaux de la Phase I étaient incomplets, et pour développer le détail nécessaire pour décrire le comportement mécanique, des essais supplémentaires furent accomplis pour donner l'information suivante:

1. La compaction en fluage des résidus granulaires;
2. La résistance des résidus en fonction de la porosité;
3. La rigidité des résidus en fonction de la densité;
4. La quantification des effets des contraintes, le temps, et la densité sur la microtexture des résidus; et,
5. Des indications sur la possibilité d'améliorer le comportement mécanique des résidus avec des additifs.

Pour l'éfficacité et pour réduire le nombre de variables, l'effet de chaque paramètre sur le comportement mécanique pendant le remblayage et la compaction naturelle dans les mines de potasse fut étudié en détail. Des paramètres externes (contrainte, vitesse de déformation, température), seulement les deux premiers sont considérés comme étant variables et incontrôllés. La température est peu variable pendant la vie active de la mine. Des paramètres internes (impuretés, granulométrie, teneur en eau et porosité), seulement la teneur en eau et la porosité ont été inclues comme variables pour le programme d'essais.

Une caractérisation des propriétés physiques de chaque matériau a été nécessaire pour aider l'interpétation des essais. L'examination de la granulométrie, de la minéralogie, et des relations porosité/teneur en eau dans le remblais ont été inclus. Des essais de fluage ont permis l'évaluation de l'effet des contraintes, la vitesse de déformation, la teneur en eau, et la porosité sur la compaction en fonction de temps. La résistance fragile des résidus consolidés a été étudiée pour évaluer la possibilité de rupture en cisaillement. Deux paramètres furent investigués:

1. Le développement de la résistance dans les résidus sous contraintes différentes; et,
2. La resistance sous contrainte compressive à des densités fractionelles diverses.

Les résidus comprennent des petits cristaux intacts de sel gemme. Ils subissent les mêmes mécanismes fondamentaux de déformation que le sel gemme intact : dislocation, diffusion, glissement sur les frontières intercristallines, et la déformation par ruptures élastoplastiques des grains. In situ, le mécanisme qui contrôle la vitesse de compaction en fluage est déterminé par les conditions externes (contraintes, température) et internes (teneur en eau, granulométrie). Le transfert de masse par la solution-précipitation a été suggèré comme un mécanisme important, peut-être dominant, sous les conditions de

température et contraintes qui se trouvent dans les mines de potasse au Canada. Ces études l'ont identifié comme étant important dans la compaction des résidus. A contrainte faible, les exposants des relations de fluage sont entre 1,5 et 2,0, ce qui indique la présence des déformations solution-précipitation (Spiers et al., 1989). A contraintes intermédiaires, le glissement intergranulaire devient dominant si l'eau est présente. La présence de grains écrasés signale aussi les mécanismes de compaction élastoplastiques. Ce dernier est plus ou moins indépendent du temps, et est caractèrisé par une limite de déformation définie, liée aux contraintes. Après l'application soudaine d'une contrainte, les processus élastoplastiques sont la cause de la densification initiale et rapide d'une masse de grains. Quand les contraintes ponctuelles sont redistribuées, la déformation élastoplastique cesse. Sous conditions in situ, la compaction élastoplastique rapide est rare à cause de l'échelle de temps (les changements de contraintes sont très lents).

Alors, en étudiant les résultats des essais, nous avons identifié les mécanismes de déformation les plus importants:

1. La solution-précipitation à contraintes et vitesses de compaction faibles (< 2 MPa et < $10^{-6}s^{-1}$);
2. Le glissement des grains à des vitesses de compaction volumétriques intermédiaires (au dessus de $10^{-6}s^{-1}$); et,
3. La déformation élastoplastique à tous niveaux de contraintes, à condition d'application soudaine de contraintes d'ampleur suffisante.

Les contraintes dans les résidus remblayés seront faibles pour un temps étendu, jusqu'au point que la fermeture des chambres commence à transférer les contraintes qui existent dans les piliers. Sous ces conditions, la solution-précipitation sera le mécanisme principal de compaction. Un modèle empirique qui décrit la compaction en fluage a été développé avec quelques suppositions, liées aux observations:

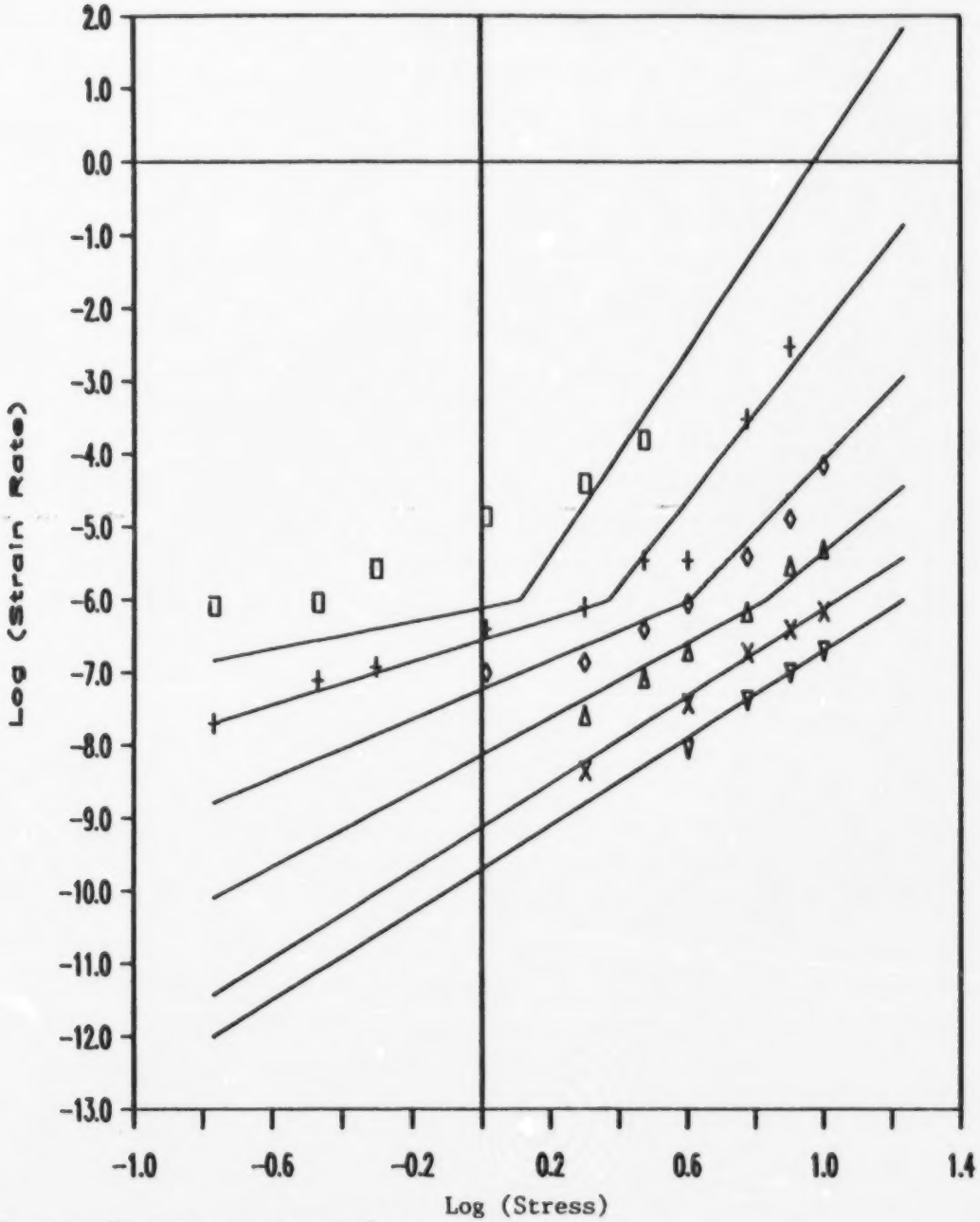
1. In situ, la compaction volumétrique rapide provoqué par la déformation élastoplastique est invraisemblable, et nous l'avons négligée dans notre modèle de comportement;
2. La compaction volumétrique sous les conditions in situ aura lieu dans deux régimes de fluage: le glissement des grains à vitesse rapide, et la solution-précipitation à vitesse lente;
3. Dans ces deux régimes, la vitesse de compaction volumétrique est une fonction du niveau des contraintes, étant donné que la densité fractionelle est plus élevée que 60%;
4. On suppose que la vitesse de compaction volumétrique et la contrainte effective caractéristique qui délimitent ces deux régimes de fluage sont des paramètres constants; et,
5. A des densités fractionelles plus élevées que 75%, dans la gamme de contraintes et vitesses étudiée, les deux régimes de fluage semblent s'amalgamer dans un seul régime de fluage avec un exposant de 3,0, ce qui nous signale que les processus de déformation intergranulaire commencent à devenir dominants.

La loi de fluage proposée est démontrée dans la figure n° 5.

La résistance fragile des résidus est liée à la porosité, et aussi à la vitesse de déformation pour achever cette porosité. Sous les conditions in situ, les résidus se tasseront lentement sous les contraintes actives. Au laboratoire, les échantillons de résidus pulvérulents se tassent beaucoup plus rapidement que les résidus dans la mine. La compaction rapide est controlée par les processus élastoplastiques (l'écrasement et la rupture des grains), alors que la croissance de la résistance fragile est liée à la superficie des grains et à la densité de l'échantillon. Sous les conditions in situ, la solution-précipitation "recuit" les surfaces de contacte des grains, car le sel gemme en solution se précipite dans les vides, entre et à coté des surfaces de contacte, créant une cimentation structurelle entre les grains. Cette cimentation a l'effet de créer une roche poreuse, au lieu d'un milieu pulvérulent.

FIGURE 5

Halite Backfill Empirical Creep Law Fit



Density (fractional density):

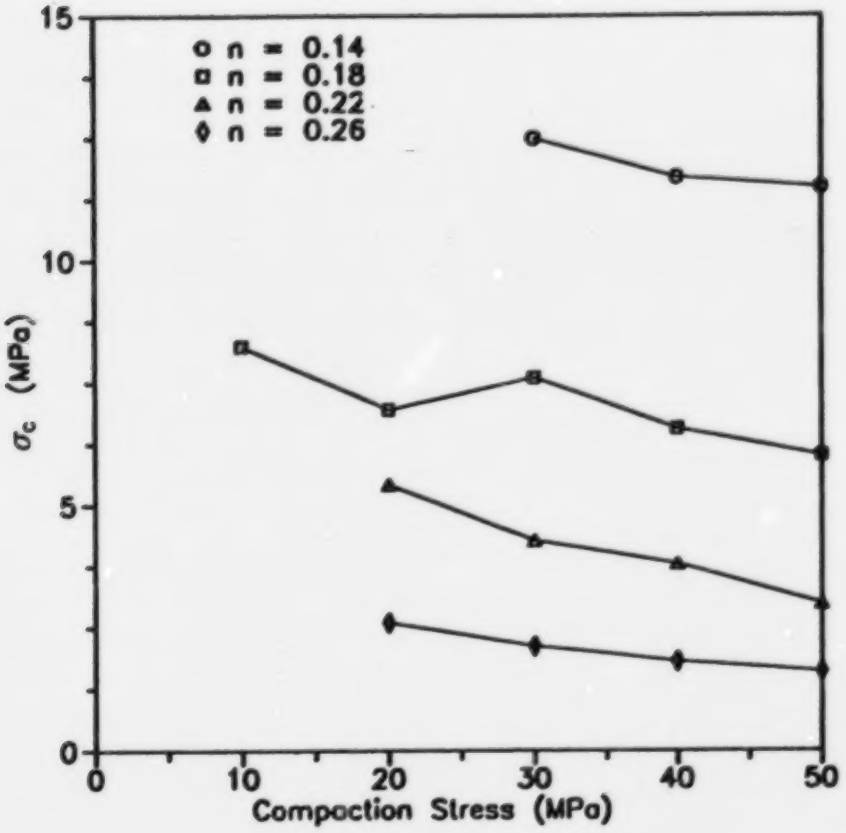
□ 1.2 (0.56) † 1.3 (0.61) ◊ 1.4 (0.65) Δ 1.5 (0.70) X 1.6 (0.75) ▽ 1.7 (0.79)

Les résultats des essais de résistance furent extrapolés pour estimer les conditions in situ. Une extrapolation linéaire à la gauche des courbes dans la figure 6 donne une résistance équivalente à la compaction à vitesse "zéro"; alors, à une porosité de 1%, nous pouvons estimer une valeur de résistance à la compression simple pour les résidus de DPPC à un état de compaction terminale. Aussi, nous remarquons qu'en dessous d'une densité fractionelle de 70%, les résidus ne possèdent aucune résistance fragile, et, au dessus de cette limite, la résistance peut-être estimée en fonction de cette densité.

La rigidité manifestée (M_{50}) a été estimée des courbes de déformation à 50% de la résistance maximale. Sous une augmentation de contrainte rapide, un milieu poreux évidence l'écrasement des grains, la microfissuration, la réorientation des grains, et aussi la déformation élastique des grains individuels. La séparation des effets élastiques est difficile. Alors, la rigidité des résidus de sel gemme est une mesure de tous les types de déformation, permanente et récupérable, mesurés ensemble quand l'échantillon subit une changement de contrainte déviatorique. Tous les résultats des essais ont été analysés pour obtenir une relation en forme discrète entre M_{50} et la densité fractionelle. Cette relation nous indique que les matériaux avec une densité fractionelle en dessous de 70% auront des rigidités très faibles.

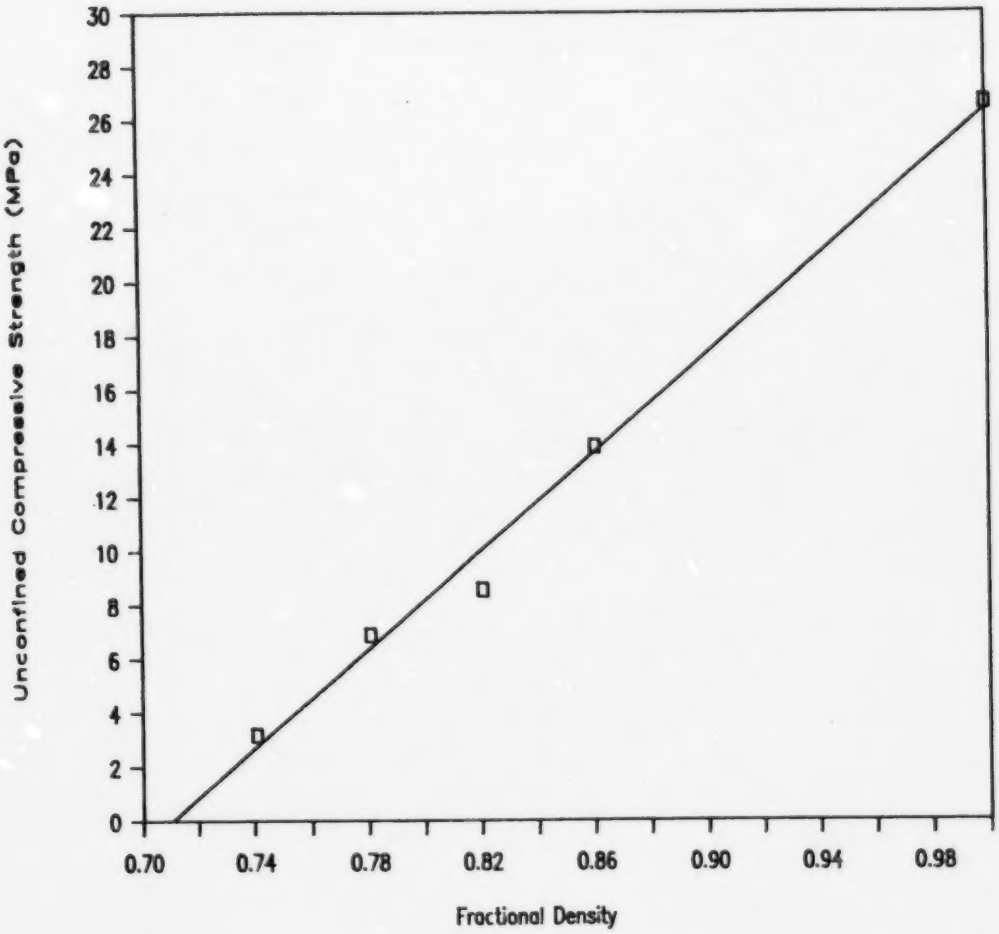
Les résultats des essais triaxiaux, présentés comme une courbe décrivant une relation entre σ_1 et σ_3, nous indiquent que le critère d'affaiblissement devient plus linéaire en fonction des porosités plus faibles. Il faut dire que pendant ces essais, les échantillons étaient toujours sous compression, et ils ont démontré la compaction avant la dilatation et l'affaiblissement (figure 8). Cette compaction était fonction des contraintes moyennes et de la porosité initiale. Pour estimer une résistance à une "contrainte à compaction négligeable" pour décrire les relations, plusieurs essais supplémentaires auraient été nécessaires, et même avec ces données, une extrapolation aux conditions in situ aurait été difficile. Cependant, on peut

FIGURE 6



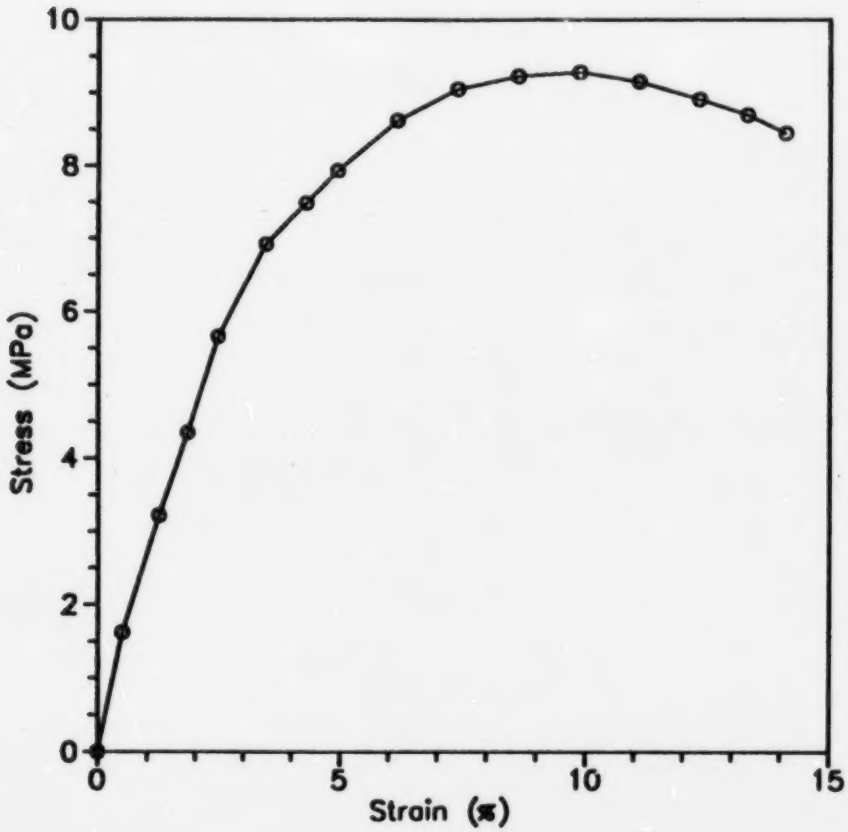
Unconfined compressive strength vs. compaction stress for test specimens at porosities of 0.14, 0.18, 0.22 and 0.26.

FIGURE 7



'Zero compaction stress' σ_c as a function of fractional density for DPPC halite backfill.

FIGURE 8



Stress/strain diagram for halite backfill compacted to n = 0.22, confining stress 1.03 MPa, axial strain rate 10^{-4} sec^{-1}.

assurer que les valeurs acquises sont conservatrices.

Un programme d'essais fut accompli pour estimer l'effet des additifs sur la résistance des résidus de DPPC. Deux types d'additifs furent étudiés: le sable, et le ciment. Le sable utilisé pour les essais provenait d'une carrière locale, Sussex Silica, près de la mine DPPC. Le but de l'addition de sable était de réduire la porosité de placement des résidus pour que le temps et la fermeture pour achever une densité suffisante soient réduits. Le ciment a été ajouté pour influencer la résistance, ce qui est fonction de la teneur en eau et de la quantité de ciment. Pour obtenir une résistance à la compression simple de 1,3 à 2,0 MPa, il fallait ajouter de 9% à 10% de ciment (par poids). En effet, c'est la création d'un béton en utilisant les granulats halitiques. Les additifs, comme le sable et le ciment, peuvent toujours amélioré la résistance et la rigidité, étant donné qu'on les ajoute en quantités suffisantes.

4.0 LES ANALYSES PARAMETRIQUES DES DONNEES SUR LE SEL GEMME

Depuis la fin de la Phase I, beaucoup d'effort a été dirigé vers les analyses des données de comportement in situ, et dans le laboratoire pour développer des paramètres pour la modélisation numérique. Ces travaux comprennent:

1. Le développement d'un nouveau critère pour lier les contraintes de cisaillement avec la vitesse de fluage;
2. Une réévaluation des données initiales in situ et du laboratoire;
3. Une réévaluation des paramètres de comportement venant des données in situ et du laboratoire; et,
4. La détermination des paramètres spécifiques pour les nouvelles analyses numériques.

Une loi de fluage est une relation mathématique qui lie la condition générale des contraintes dans un corps à une condition de vitesse de déformation. Dans les études de Phase I, le critère Tresca fut utilisé, mais dans les études Phase II, nous avons utilisé un critère Von Mises. La difficulté avec le critère Tresca est que cette formulation suppose que les tractions et les compressions donnent les mêmes effets extérieurs (sauf que la direction est changée), ce qui est sans doute faux pour les roches. Aussi, le critère Tresca ne prévoit aucun effet des contraintes intermédiares (σ_2). La littérature publiée la-dessus nous a signalé que le critère Von Mises est considéré comme étant supérieur.

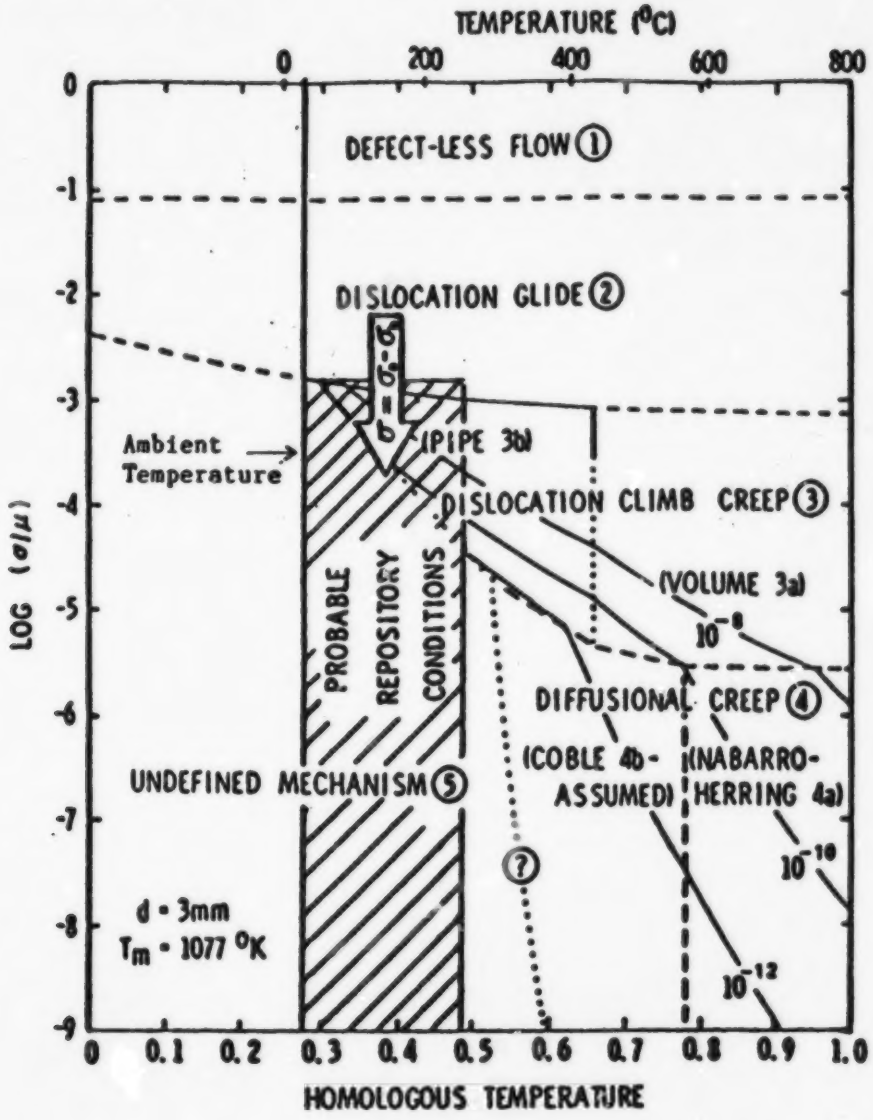
Les études sur la petite chambre d'essais in situ ont été refaites en utilisant la définition des contraintes de fluage plastique provenant du critère Von Mises, avec un maillage numérique supérieur, et avec les mêmes conditions géométriques et initiales qu'auparavant. La prédiction des vitesses de fermeture in situ était 5,5 fois plus grande que la réalité.

Nous supposons que seulement deux mécanismes de déformation (n° 2 et n° 5) agissent dans les conditions typiques qui se

trouvent dans une mine (figure 9). Cette observation nous a dirigé vers l'idée d'une loi de fluage avec deux régions caractéristiques, chacune avec sa propre loi individuelle, séparées par un niveau de contrainte déviatorique typique (σ_o). Le mécanisme n° 5 évidence un exposant de 3, et la réévaluation des données nous indique que le mécanisme n° 2 est caractérisé par un exposant de valeur 6,9 (au lieu de 5,8).

La prochaine étape dans la réévaluation complète était d'évaluer la contrainte déviatorique typique (σ_o) et la vitesse associée à cette contrainte pour mieux reproduire les vitesses de fermeture dans la mine. Trois analyses numériques complètes ont été nécessaires, et une analyse statistique par la méthode de régression nous a démontré que des relations exponentielles existaient, et que les prédictions utilisant les nouveaux paramètres étaient très proches de la réalité. Toutes ces études de réévaluation nous donnent beaucoup de confiance dans la méthode d'analyse intégrée que nous avons développée. Les prédictions de comportement in situ ont été améliorées beaucoup depuis la Phase I.

FIGURE 9



Deformation Mechanism Map for Salt
(After Munson, 1979).

5.0 LA MODELISATION NUMERIQUE EN DEUX DIMENSIONS

Le logiciel FLAC, développé par ITASCA Consulting Group Inc., était l'outil pour les analyses numériques en deux dimensions. La loi de fluage utilisée dans ces études a été développée durant une coopération entre MPC et l'Université de Waterloo. Elle a été incorporée dans le logiciel FLAC par les ingénieurs d'ITASCA. FLAC utilise un système de différences finies, et peut analyser des problèmes de grands déplacements, y inclus la plasticité, le fluage, l'interaction structurelle, et les interfaces discrètes. Elle fonctionne sur un micro-ordinateur pour les problèmes axi-symétriques, ou les analyses de contraintes en plan, ou de déformations en plan.

Pour la vérification de FLAC, le cylindre à mur épais et axi-symétrique fut analysé sous conditions de contraintes isotropes. Parce que cette solution existe en forme discrète (solution analytique), la vérification consiste d'une comparaison entre les deux résultats (numérique et analytique). Cette vérification, pour une couche épaisse de sylvanite, était très précise.

Avant d'utiliser FLAC pour les prédictions dans la mine, la calibration avec les données de la petite chambre d'essais était nécessaire, en utilisant les paramètres initiaux et la loi de comportement que nous avons développé. Après cette calibration, la corrélation entre les prédictions numériques et la réalité sur chantier était bonne.

Plusieurs scénarios d'exploitation, existants et prévus, ont été analysés avec FLAC pour signaler l'existence potentielle de concentrations dangeureuses de contraintes et de zones d'affaiblissement. La fermeture totale et la vitesse de fermeture des chambres ont été évaluées pour comprendre la réponse moyenne de la mine à des changements de géométrie souterraine.

Utilisant les paramètres et la loi proposés, la

correspondance entre les prédictions numériques et les fermetures dans les chambres d'essais installées dans les régions non-actives de la mine étaient acceptables. La vitesse de fermeture des grandes chambres d'exploitation active a été sur-estimée à cause des effets deux-dimensionels. On signale aussi la possibilité d'autres difficultés pendant l'exploitation si le toit des chambres consiste d'une couche de sel gemme trop mince (un toit épais de sel gemme donne une stabilité supérieure à cause de la redistribution plus éfficace des contraintes). Néanmoins, dans toutes conditions du toit, nous signalons la nécessité d'inspections fréquentes et le boulonnage de bonne qualité.

Les contraintes horizontales et verticales prévues étaient à des niveaux de sécurité suffisantes pour les pressions interstitielles (9 MPa) dans les couches élastiques supérieures. Dans tous les scénarios, la stabilité des grands piliers a été confirmé à un niveau de sécurité acceptable.

La loi de compaction en fluage pour les résidus a été incorporée dans le logiciel FLAC. Ensuite, FLAC a été utilisé pour étudier l'effet de la méthode de remblayage et de la méthode d'extraction secondaire. En variant la densité de placement des résidus, l'effet de placement a été modélisée. L'organisation temporelle de l'extraction secondaire était modèlisée avec l'extraction à 5 ans et à 10 ans après le remblayage dans les chambres d'exploitation 11200 et 11240. En conclusion, le remblayage hydraulique paraît supérieur, et l'extraction secondaire peut être considerée entre 10 et 15 ans après le remblayage.

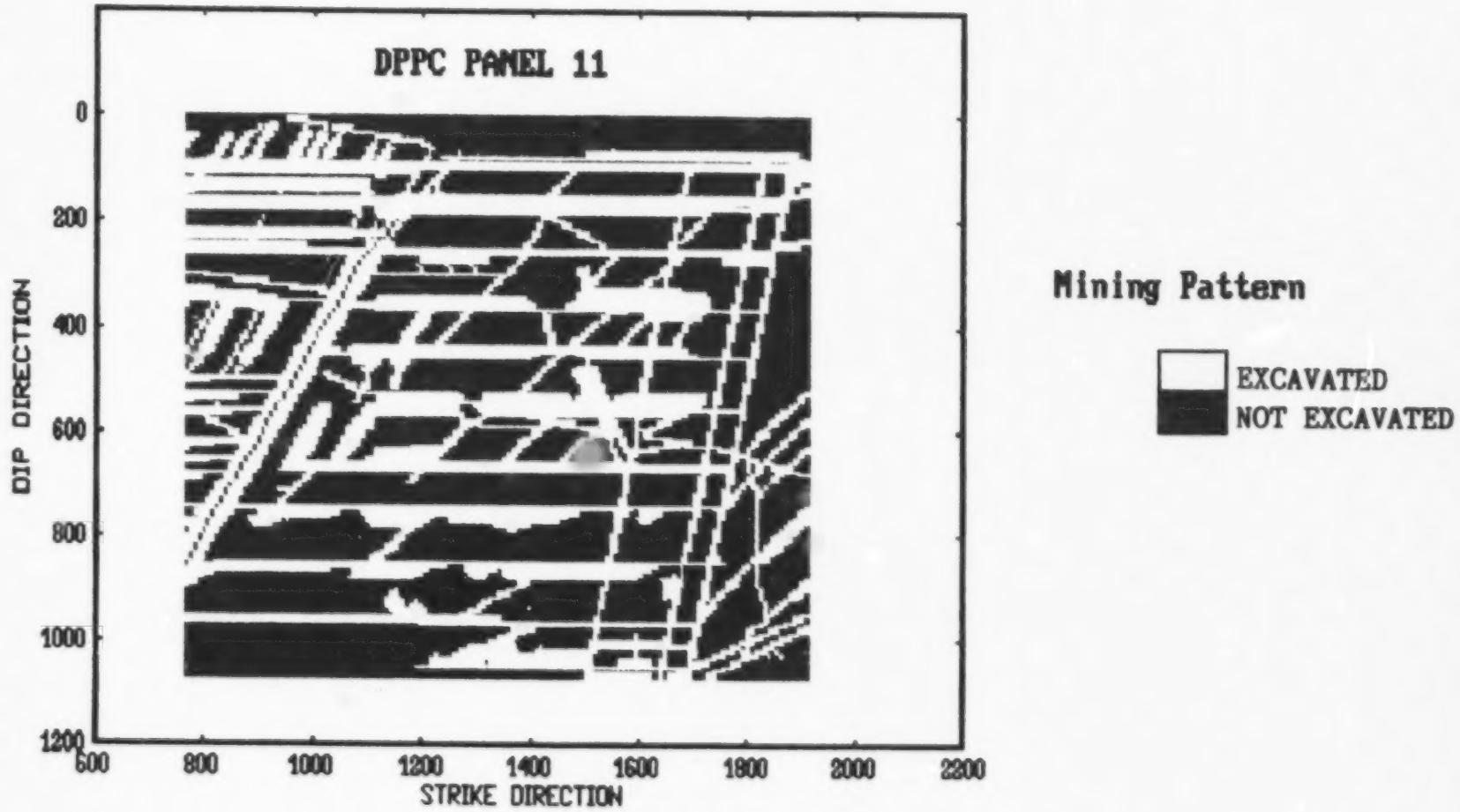
6.0 LA MODELISATION NUMERIQUE EN TROIS DIMENSIONS

La modélisation en trois dimensions fut accomplie avec le logiciel VELMINA, développé par Dr. L. ROTHENBURG à l'Université de Waterloo. Le logiciel permet la modélisation en trois dimensions des mines à large superficie, avec de nombreuses chambres et des géométries complexes. Le logiciel est basé sur une formulation mathématique et rigoureuse de la méthode de déplacements discontinus pour un milieu anisotrope et linéairement viscoélastique hors de la couche d'exploitation. Le comportement de la couche d'exploitation peut être décrit par n'importe quelle loi (régime permanent de fluage) non-linéaire et élastoviscoplastique, ce qui permet l'analyse de l'extraction et du remblayage progressifs, et la modélisation des conditions transitoires. On peut aussi traiter les roches hôtes avec des couches minces, car le logiciel a la capabilité d'analyses itératives pour déterminer les lois de comportement linéaires équivalentes aux lois non-linéaires attribuées aux roches hôtes. Pour les éléments qui réprésentent les piliers viscoélastiques, la relation entre les contraintes verticales et les contraintes plastiques effectives est décrite par les analyses parallelles utilisant la méthode d'éléments finis.

Pour représenter la complexité lithologique et stratigraphique des couches pour les analyses numériques, un logiciel spécial fut créé, dans lequel l'épaisseur des couches est calculée directement en utilisant les cartes géologiques en contours. La géométrie des Panneaux 10 et 11, comme ils existaient en 1988, a été analysée avec un maillage de 30 000 éléments. Les paramètres mécaniques et les lois de comportement étaient les mêmes que pour la modélisation accomplie sur FLAC. La vérification fut réalisée par la corrélation avec les données du comportement in situ.

Même si il y avait des pertubations minières pendant la période de surveillance, les vitesses de fermeture des chambres correspondent bien avec les prédictions numériques, et on peut supposer que cela vérifie l'approche développée. La subsidence à

FIGURE 10


DPPC PANEL 11
0
200
400
600
800
1000
1200
DIP DIRECTION
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
2200
STRIKE DIRECTION
Mining Pattern
EXCAVATED
NOT EXCAVATED

surface et les estimations des contraintes in situ ont aussi servi à établir la confiance dans la méthode d'analyse.

Le maillage pour l'analyse simultanée des Panneaux 10, 11, et 12 nécessitait 60 000 éléments, et la géométrie choisie était celle prévue par DPPC. Notre prédiction est que la vitesse de fermeture maximum dans le Panneau n° 12 sera à peu près deux fois plus rapide que celle du Panneau n° 11.

Le maillage (figure 11) et les conditions à régime permanent (figure 12) des analyses antérieures ont été utilisés en supposant qu'une densité de placement des résidus de 1,4 g/cm^3 sera possible. Une prédiction de la densité après 11 ans est présentée (figure 13), et la densification ponctuelle dans des locations variées (figure 14) en fonction de temps est tracée (figure 15). Les distributions des vitesses de fermeture en fonction du temps sont aussi présentées (figure 16).

En utilisant les prédictions de densification, il paraît que l'extraction secondaire pourra commençer dans les piliers 10 ans après le remblayage. La vitesse de fermeture pendant l'extraction secondaire sera à peu près la même que dans le Panneau n° 11 à présent (figure 17). La conclusion générale de ces études est que l'extraction secondaire des piliers dans les Panneaux n° 10, 11, et 12 sera faisable après 10 ans.

Les efforts pour la modélisation directe du placement des résidus sert à rien car les changements de densité pendant le placement sont négligeables. Néanmoins, l'exploitation actuelle prend quelques années dans chaque panneau, et la modélisation numérique utilise une excavation instantanée. L'effet réel est que la compaction en fluage des résidus remblayés sera accélerée un peu. Aussi, une exploitation secondaire lente aura l'effet de monter les contraintes qui poussent la consolidation des résidus dans les chambres remblayées, ce qui accélérera aussi le temps nécessaire pour l'extraction secondaire, car les forces verticales seront supportées plus tôt.

FIGURE 11

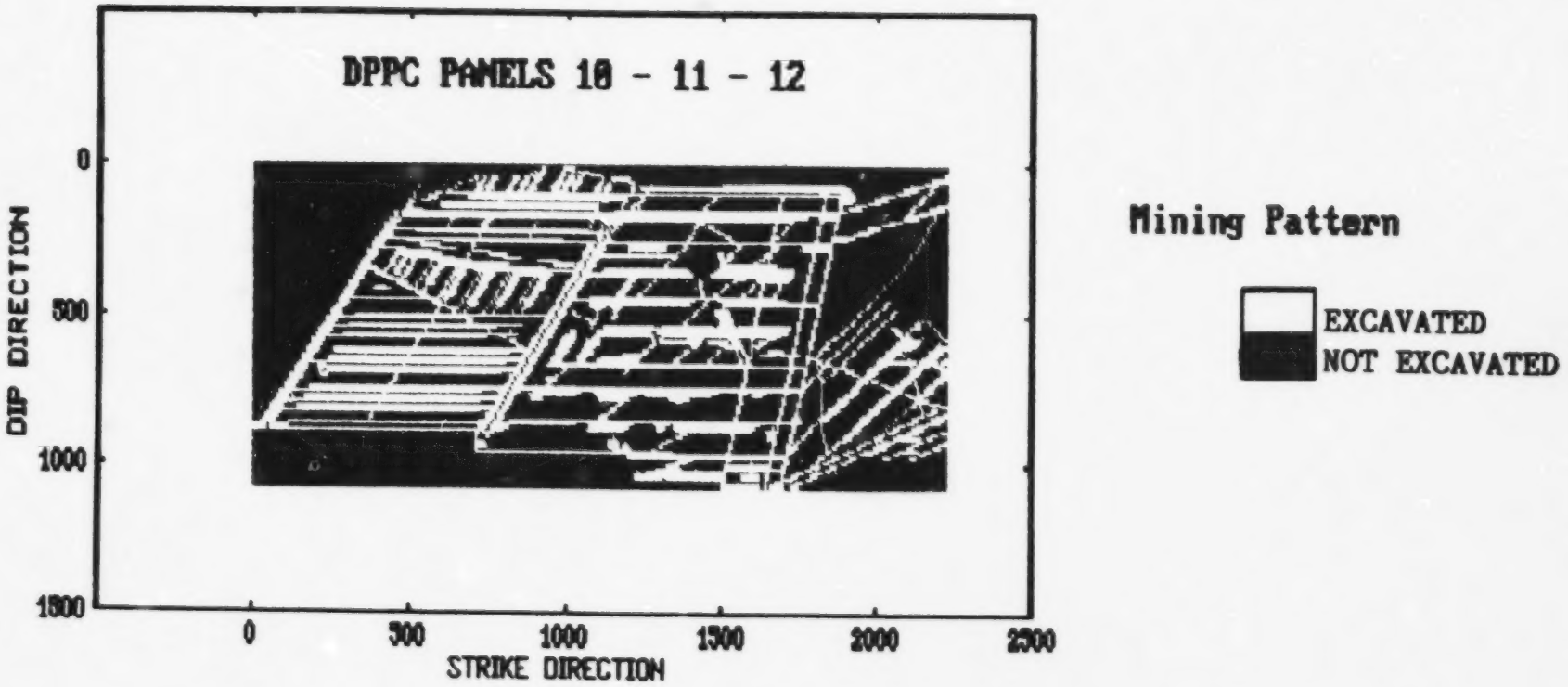

DPPC PANELS 10 - 11 - 12
DIP DIRECTION
0
500
1000
1500
0
500
1000
1500
2000
2500
STRIKE DIRECTION
Mining Pattern
EXCAVATED
NOT EXCAVATED

FIGURE 12

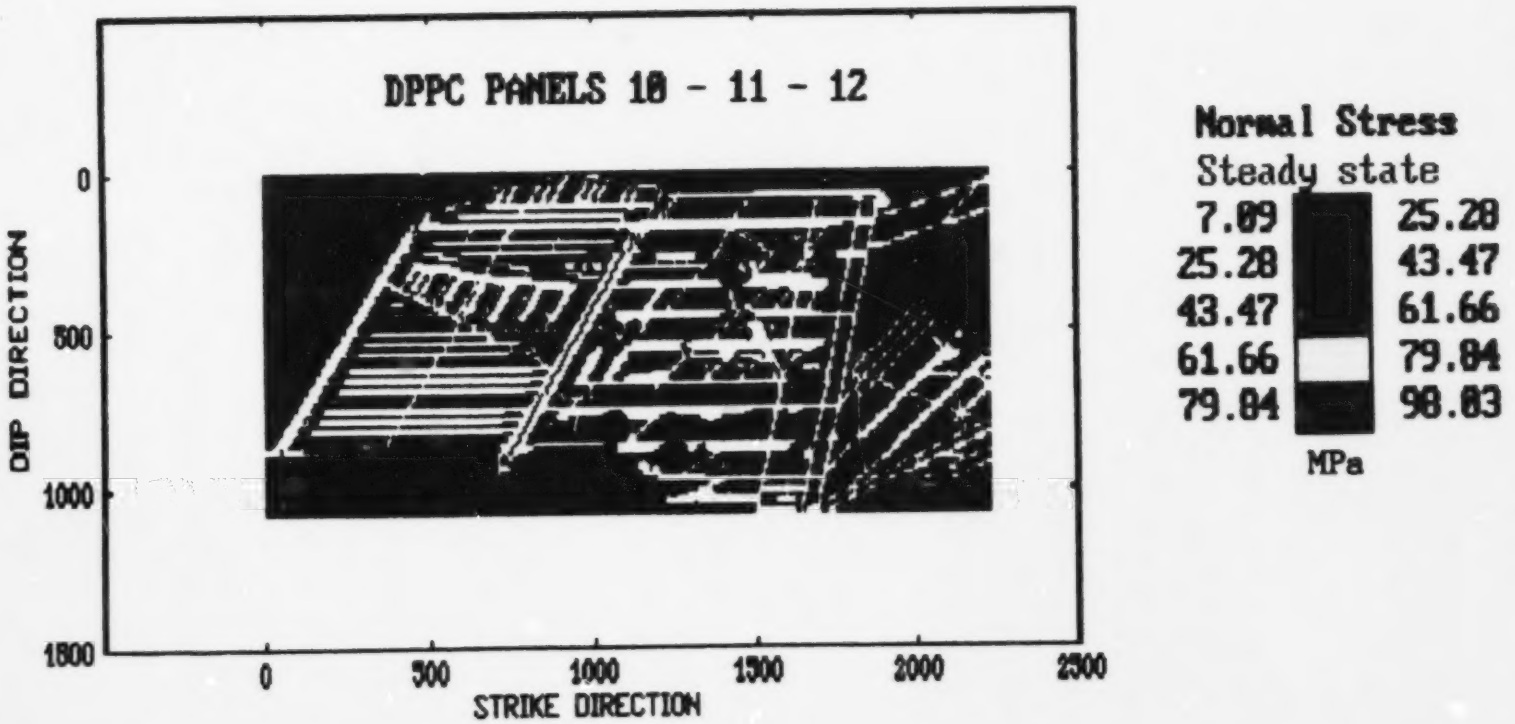

DPPC PANELS 10 - 11 - 12
DIP DIRECTION
0
500
1000
1500
0
500
1000
1500
2000
2500
STRIKE DIRECTION
Normal Stress
Steady state
7.09
25.28
43.47
61.66
79.84
25.28
43.47
61.66
79.84
98.03
MPa

FIGURE 13

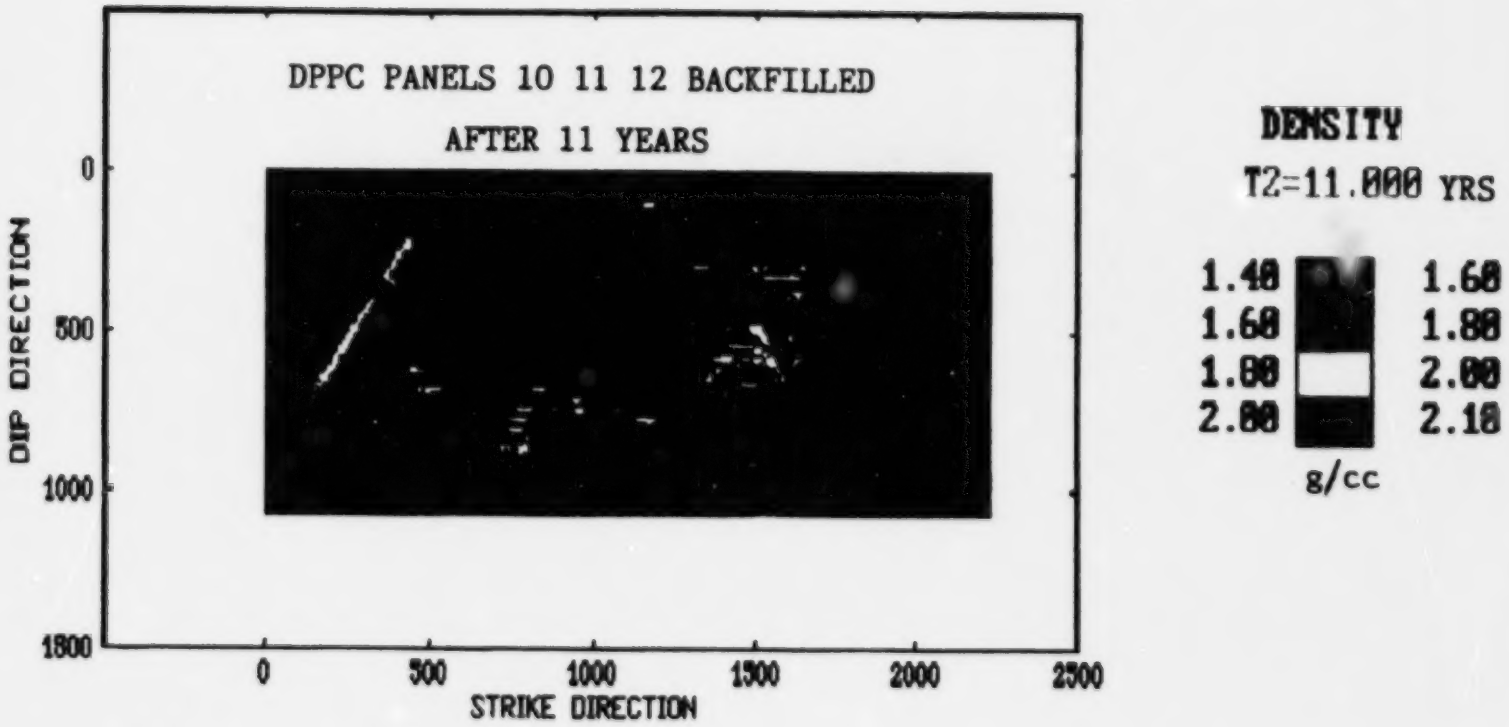

DPPC PANELS 10 11 12 BACKFILLED
AFTER 11 YEARS
DIP DIRECTION
0
500
1000
1500
0
500
1000
1500
2000
2500
STRIKE DIRECTION
DENSITY
T2=11.000 YRS
1.40
1.60
1.60
1.80
1.80
2.00
2.00
2.10
g/cc

FIGURE 14

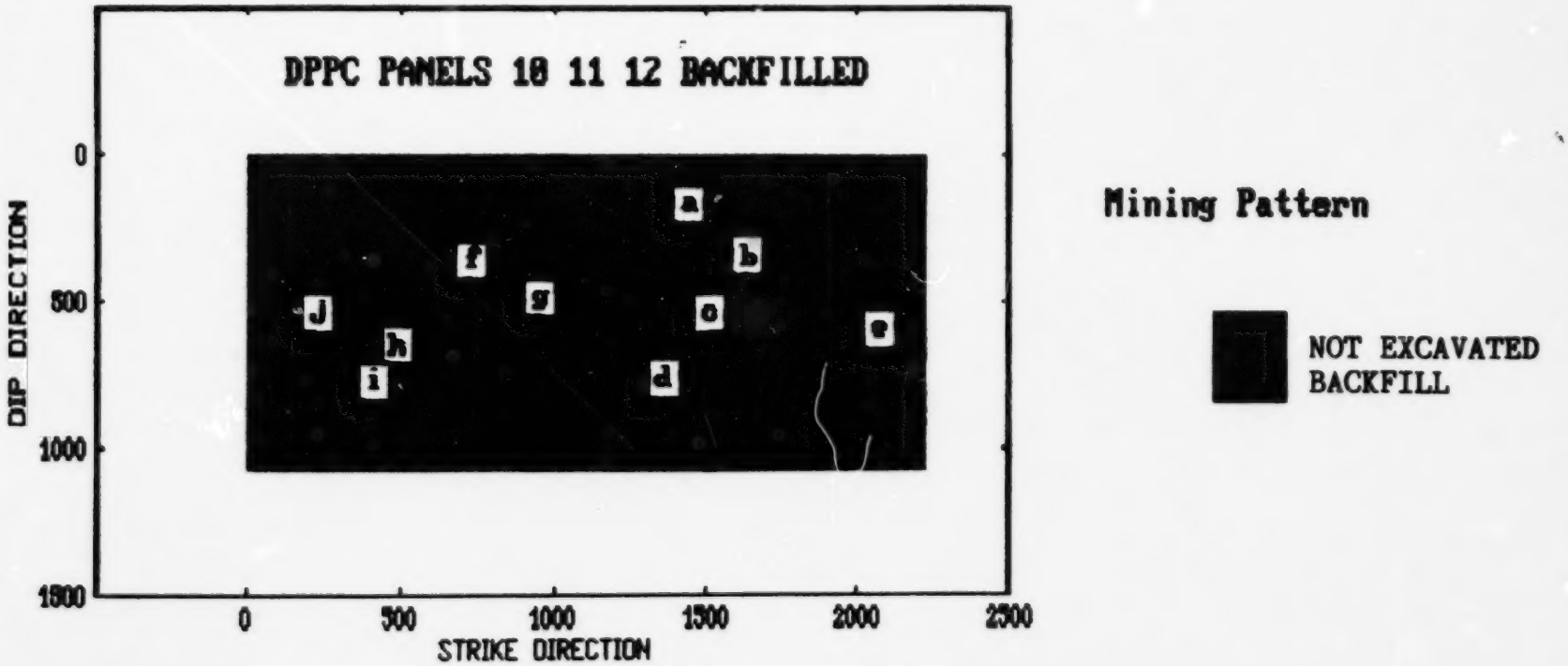

DPPC PANELS 10 11 12 BACKFILLED
DIP DIRECTION
0
500
1000
1500
0
500
1000
1500
2000
2500
STRIKE DIRECTION
a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
Mining Pattern
NOT EXCAVATED
BACKFILL

FIGURE 15

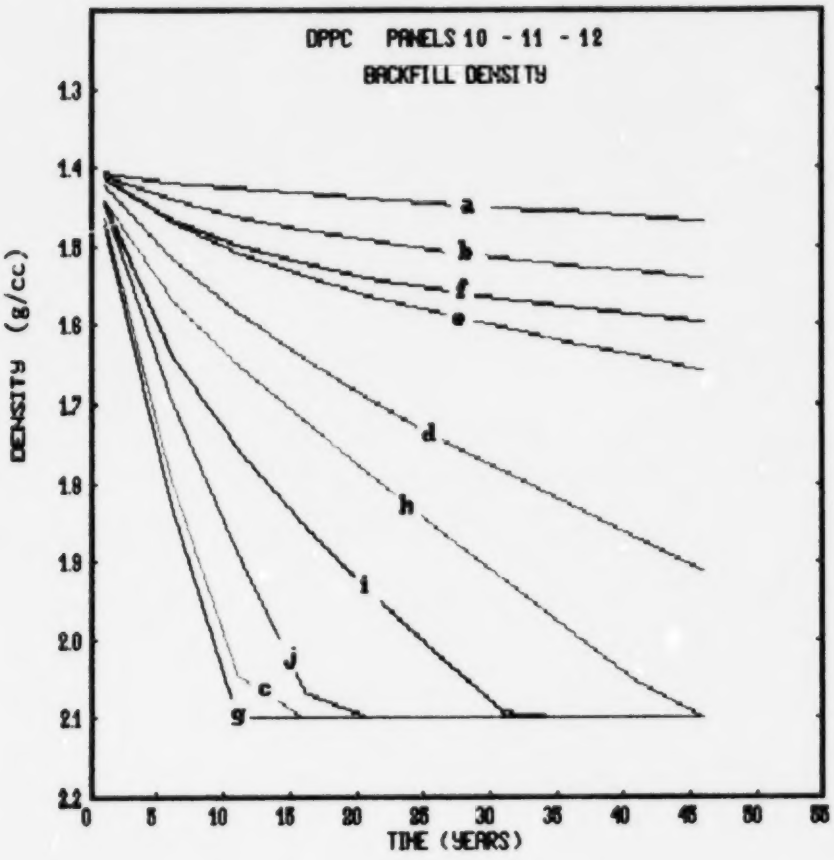

DPPC PANELS 10 - 11 - 12
BACKFILL DENSITY
DENSITY (g/cc)
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
2.1
2.2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
TIME (YEARS)
a
b
f
e
d
h
i
j
c
g

FIGURE 16

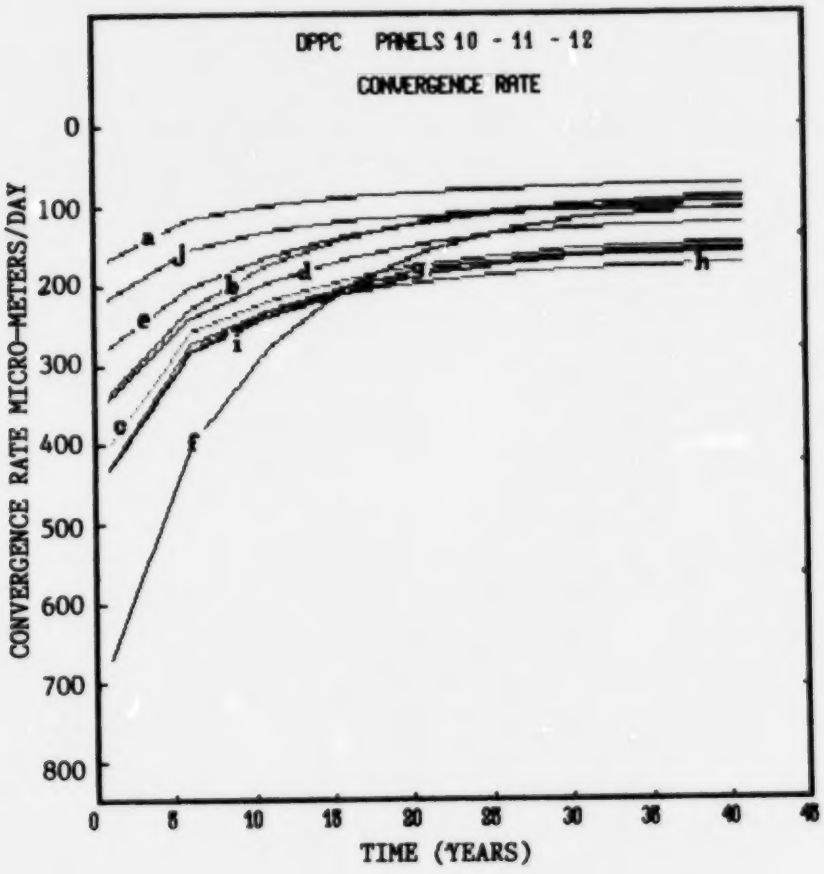
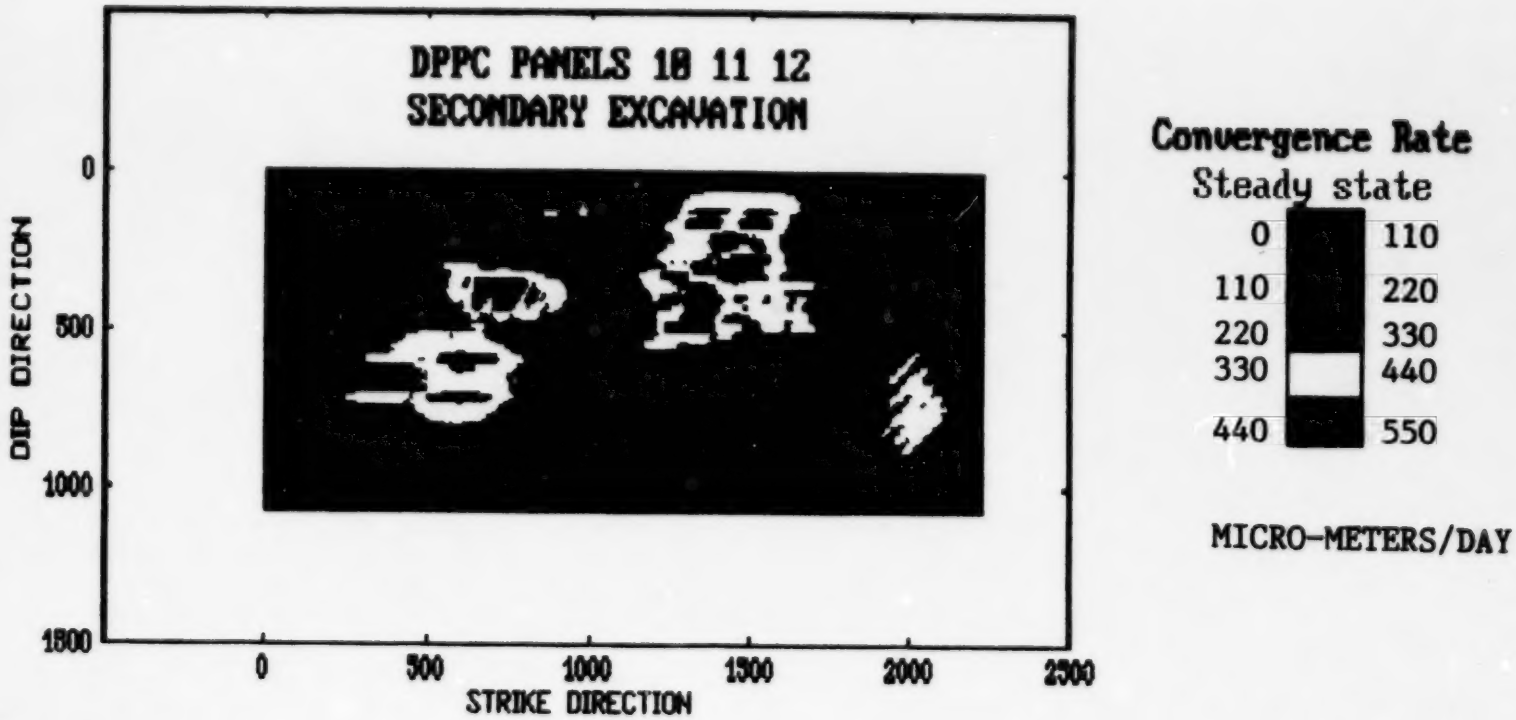

DPPC PANELS 10 - 11 - 12
CONVERGENCE RATE
CONVERGENCE RATE MICRO-METERS/DAY
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
TIME (YEARS)
a
b
c
d
e
f
g
h
i
j

FIGURE 17


DPPC PANELS 10 11 12
SECONDARY EXCAVATION
DIP DIRECTION
0
500
1000
1500
0
500
1000
1500
2000
2500
STRIKE DIRECTION
Convergence Rate
Steady state
0
110
110
220
220
330
330
440
440
550
MICRO-METERS/DAY

7.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Courrament, la méthode de placement des résidus limite la densité initiale à 1,26 g/cm^3 (60% densité fractionelle) à cause de l'impossibilité de remplir les chambres complètement. Les études de practicabilité accomplies par DPPC et les résultats des essais souterrains signalent que le placement hydraulique est le plus efficace, et donnera une densité initale plus élevée que les autres moyens. A l'avenir, le but est une densité initiale de 1,4 g/cm^3 minimum (densité fractionelle de 65%). En tout cas, étant donné que la possibilité existera, il faut remplir les chambres jusqu'au plafond avec le placement hydraulique pour achever cette densité moyenne de 1,4 g/cm^3.

2. Les cellules gaufrettes pour la surveillance du développement de contrainte ont indiqué que, dans la période active des essais, la compaction gravitationelle agissait, et les remblais ne supportaient pas les couches supérieures.

3. Les sites de surveillance dans le Panneau n° 11 ont indiqué une vitesse de fermeture de 100 mm par an. Cette vitesse paraît uniforme pendant toute la période de surveillance, ce qui nous dit que la convergence de la mine est dirigée par les processus du régime de fluage permanent.

4. L'instrumentation installée dans les entrées triples du Panneau n° 11 a indiqué que la méthode de développement proposée protégera l'entrée principale par la redistribution des contraintes.

5. La vitesse de subsidence maximum à surface est 33,6 mm par an.

6. En étudiant le comportement des résidus dans les essais de laboratoire, on suppose que les mécanismes de déformation fondamentaux sont:

   a. La solution-précipitation à des contraintes inférieures à 2 MPa, et à des vitesses de compaction volumétriques inférieures à $10^{-6}s^{-1}$;
   b. Le glissement des grains à des vitesses de compaction volumétriques plus élevées que $10^{-6}s^{-1}$; et,
   c. La déformation élastoplastique avec l'écrasement des grains individuels quand les contraintes sont élevées soudainement.

   Nos observations nous suggèrent que le dernier mécanisme sera négligeable in situ; alors nous proposons une loi de fluage empirique, callée sur les essais, avec deux régions caractérisées par des exposants différents.

7. Basé sur les essais au laboratoire, on peut conclure que le remblais avec une densité fractionelle inférieure à 70% a une résistance négligeable. Au-delà de cette limite, on peut décrire la résistance comme une fonction linéaire de la densité fractionelle.

8. La résistance triaxiale des résidus s'accroît avec la densité. L'application du critère Mohr-Coulomb au données indique que cette résistance peut être exprimée avec un frottement et une cohésion liés linéairement à la densité fractionelle.

9. Si le sable est mêlé avec les résidus, la porosité initialle sera réduite, ce qui réduira le niveau de consolidation nécessaire pour le support des forces verticales. Si 10% de ciment est ajouté au résidus halitiques, la porosité initiale sera réduite, et une résistance à la compression simple de 2 MPa sera créée.

10. Le logiciel FLAC pour les analyses en deux dimensions a été utilisé pour la modélisation sous conditions de contraintes en plan. La géométrie totale de la mine nécessitait la modélisation en trois dimensions, et le logiciel VELMINA a été utilisé. Une bonne correspondance entre les prédictions numériques et les données in situ existe.

11. Les prédictions de vitesses de fermeture du logiciel VELMINA correspondent très bien avec les mesures de subsidence à surface. Cela signale que les couches supérieures convergent d'une manière uniforme, sans la création de concentrations de contraintes.

12. Les résultats de toutes les études nous suggèrent que l'extraction secondaire sera possible 10 à 15 ans après le remblayage. L'extraction secondaire lente donnera même la possibilité de réaliser le deuxième cycle un peu plus tôt, à cause d'une accélération de la compaction en fluage des résidus. Cette conclusion doit être confirmée par la surveillance sur chantier. Aussi, pour l'avenir, nous suggérons l'échantillonage systématique de la densité des remblais qui se tassent lentement; cela est éssentielle pour mieux comprendre le comportement à longue terme de ces matériaux.

8.0 BIBLIOGRAPHIE

Munson, D.E., 1979. Preliminary Deformation Mechanism Map for Salt. Sandia National Laboratories Report SAND79---76.

Spiers, C.J., Peach, C.J., Brzesowsky, R.H., Schutjens, P.M.T.M., Liezenberg, J.L., and Zwart, H.J., 1989. Long Term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt Rocks. Final Report to the Commission of the European Communities, CEC Contract No. FI1W-0051-NL.

Waugh, D.C.E. and Urquhart, B.R., 1983. The Geology of Denison-Potacan's New Brunswick Potash Deposit. Proc. 6th International Symposium on Salt, Vol. 1, The Salt Institute, Alexandria Virginia, pp 85-113.